# 凯里鱼洞河流域煤矿废水治理方法研究

王彤标[1]，周舟[2]，王明章[3]，田要广[1]，王刘文[1]，李海[4]，潘显威[4]，杨胜辉[2]，宋建军[5]
（1.贵州省煤矿设计研究院有限公司，贵阳 550025；2.贵州省黔东南自治州人民政府，凯里 556000；
3.贵州省地质矿产勘查开发局，贵阳 5500002；4.贵州煤设地质工程有限责任公司，贵阳 550025；
5.凯里市福源水利投资开发有限公司，凯里 556000）

**摘　要：**为解决鱼洞河流域废弃煤矿酸性废水外排的问题，针对废弃煤矿酸性废水的成因（煤系地层硫化物、氧化环境、地下水及通道）及废弃煤矿的不同开采情况，分类施策、分部实施，通过对多处废弃煤矿治理经验的总结，提出了一套相对适合该区域实际情况的“追、堵、截、围”的煤矿废水“成因—源头式生态关水污水治理法”，即追索废弃煤矿的巷道分布、封堵关键段、截流地表水、采用帷幕灌浆抬升采空区的水位。该方法的基本原理是改变地表水进入采空区后直接外流的路径，采用巷道封堵、帷幕灌浆等手段隔绝废弃煤矿采空区的氧气，同时抬升地下水位，使顶板含水层逐步恢复到原有状态、使煤矿废水变成深部滞留水、使后续补给水从高位流出。雨季检验结果表明治理效果显著。

**关键词：**废弃煤矿；酸性废水；成因-源头式；生态关水；深部滞留水
**中图分类号：**TD167　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**

## Study on treatment method of coal mine wastewater in Yudong River basin of Kaili

WANG Tongbiao[1]，ZHOU Zhou[2]，WANG Mingzhang[3]，TIAN Yaoguang[1]，WANG Liuwen[1]，
LI Hai[4]，PAN Xianwei[4]，YANG Shenghui[2]，SONG Jianjun[5]
（1.Guizhou Coal Mine Design & Research Institute Co.,Ltd.，Guiyang 550025；
2.Guizhou Qiandongnan Autonomous Prefecture Government of the People's Republic of China，Kaili 556000；
3.Guizhou Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development，Guiyang 550000；
4.Guizhou Coal-based Geological Engineering Co.,Ltd.，Guiyang 550025；
5.Kaili Fuyuan Water Resources Investment and Development Co. , Ltd.，Kaili 556000）

**Abstract:**In order to solve the problem of acid wastewater discharged from abandoned coal mines in the Yudong River basin, according to the cause of formation of acid wastewater(sulphide in coal measure stratum, oxidation environment, groundwater and channel) and different mining conditions of waste coal mine, classified measures and partial implementation are carried out, by summing up the treatment experience of many abandoned mines, puts forward a set of“Cause-source ecological water-shut-off wastewater treatment method” for coal mine wastewater, which is relatively suitable for the actual situation of the region, that is, tracing the distribution of the roadway in the abandoned coal mine, blocking the key section, intercepting the surface water, using curtain grouting to raise the water level in the goaf. The basic principle of this method is to change the path of direct outflow of surface water after entering goaf, to use the means of tunnel blocking and curtain grouting to isolate the oxygen in the goaf of the abandoned coal mine, and to raise the groundwater level, make the roof aquifer gradually restore to the original state, so that coal mine wastewater become into deep water retention, so that subsequent recharge water to flow out from a high position. The test results of rainy season show that the treatment effect is remarkable.
**Keywords:**Abandoned coal mine; Acid wastewater; Cause-source tream type; Ecological water-shut-off; Deep stagnant water

凯里市鱼洞河流域原有煤矿众多、采空面积大。煤矿被关闭后，每年酸性废水外排量超过 800 万 $m^3$，导致该流域河道水质及饮用水源遭受严重污染。为此，凯里市鱼洞河流域生态环境综合治理项目被列为国家生态环境部点名督察（回头看）项目，也是黔东南州政府绿色环保生态修复项目的重点标兵项目。

国内针对煤矿废水及治理的相关问题，武强等[1]、唐常源[2]综合分析了煤矿开采对水环境的影响，李怀展等[3]则指出了矿井废弃后引发的系列环境问题，郑雅杰等[4]研究了石灰-氢氧化钠二段中和法，杨晓松等[5]研究了高浓度泥浆法，石太宏等[6]设计了连续碱度产生系统反应器，林海等[7]、王颖南等[8]分析了硫酸盐还原菌及胞外聚合物处理矿山废水的机理，王秀田[9]分析了硅酸盐细菌 BM03 菌株对煤矿废水的吸附效果，周立祥[10]提出了“生物矿化-石灰中和”新型被动处理系统，郭超[11]、赵计伟等[12]总结了煤矿废水处理技术的应用性能、存在问题并提出改进建议。贵州省内相关研究及应用成果也较多，高建国等[13]总结了贵州省内煤矿废水含悬浮物、酸性含铁锰等的分布规律，莫樊等[14]研究了水城汪家寨煤矿井下水的处理及再利用，张瑞雪等[15]针对贵州煤矿废水特点提出坑口“（有氧/缺氧）垂向折流式反应池”技术，康娓等[16]研究了石灰中和沉淀法和石灰石中和法处理织金、贵阳煤矿废水，谢代兴等[17]对德江、印江受煤矿废水污染的水源、土壤进行了重金属含量等分析，刘海等[18]研究了利用自然条件处理龙里县废弃矿井废水的相关技术，胡长春等[19]探讨了都匀杨柳街河修建人工水坝自然曝气和库区沉淀对水质的改善及局限性。

针对鱼洞河流域，梁浩乾等[20]分析了煤矿废水外排对水环境的影响，段江飞等[21]确定了煤矿废水的主要污染因子，于春勇[22]探讨了桃子冲泉污染与煤矿废水的关系，罗康生等[23]、许帅[24]、张钟远等[25]采用 DTM 空间分析、三线图等方法分析了岩溶地下水化学类型、污染程度等变化规律，李曦滨[26-27]提出了通过综合勘查采用源头控制+末端治理的综合治理技术，李文波[28]提出采用水平定向钻区域治理技术及封堵关键通道、充填采空区等治理方法。

现有研究成果大多从环境保护的角度出发、采用需要人工干预的末端治理方式，而从水文地质、工程地质、环境地质的角度出发，从源头上进行治理的方法较少。本着“问题－成因－方法”的治理思路，针对煤矿废水成因及废弃煤矿的不同开采情况，通过对多处废弃矿井治理经验的总结，提出了一套相对适合该区域实际情况的分类治理、分部实施的煤矿废水“成因－源头式生态关水污水治理法”。雨季检验结果表明治理效果显著且治理费用得到有效控制。

## 1 鱼洞河区域水文地质条件

### 1.1 地层及富水性

鱼洞河区域开采中二叠统梁山组（$P_2l$，以炭质页岩、砂岩、煤、铝土质页岩为主，一般厚 10～20m，富水性弱）的单一煤层（煤厚一般 0.7～1.2m，位于煤系地层上部）。梁山组上覆中二叠统栖霞、茅口组（$P_2q$-$m$，以中厚层～厚层泥晶灰岩、生物屑灰岩为主，夹少量砂页岩，厚 117～330m，富水性强），下伏上泥盆统尧梭组（$D_3y$，厚层块状白云岩、白云质灰岩、生物屑灰岩等，富水性中等～强）。见图 1。

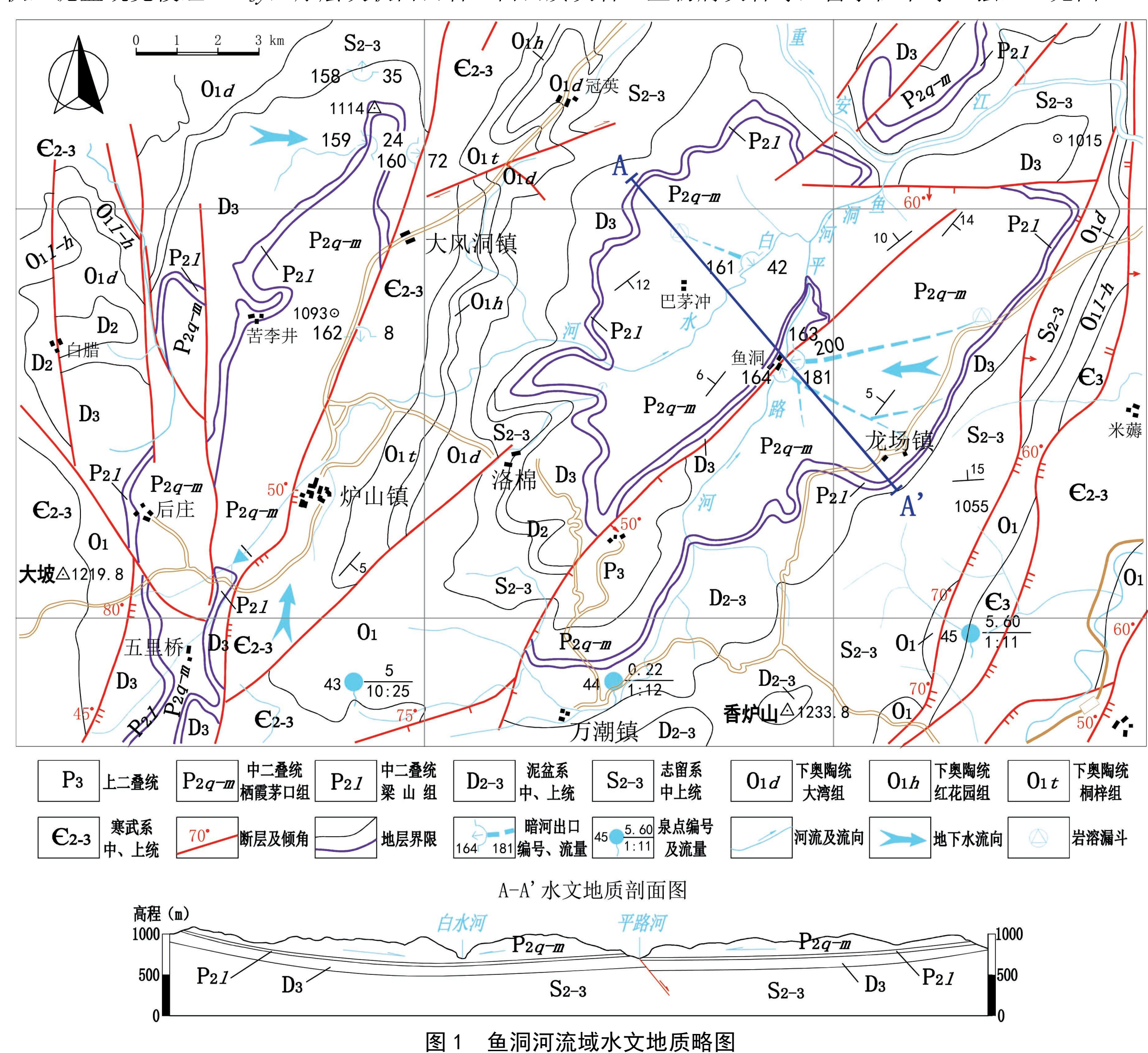



图 1 鱼洞河流域水文地质略图

Fig.1 Hydrogeological sketch map of Yudong River basin

### 1.2 区域地下水补给径流排泄条件

该区域地表广泛分布栖霞、茅口组（$P_2q$-$m$）灰岩。大气降水沿灰岩中的节理裂隙垂直入渗补给地下

水，遇梁山组（$P_2l$）或栖霞、茅口组（$P_2q\text{-}m$）中的页岩夹层等隔水层后，地下水变水平径流，形成复杂的暗河系统。

鱼洞河流域发育一条走向北东、倾向南东的正断层，该断层北西侧为一小型向斜，轴部基本位于白水河，地下水向白水河径流；断层南东侧为倾向北西的单斜构造，地下水向北西方向的平路河径流。两条河流合并为鱼洞河并最终向北东方向汇入重安江。见图 1。

## 2 鱼洞河流域煤矿开采影响

### 2.1 鱼洞河流域煤矿分布

该区域分布三十余处煤矿，主要分布于白水河、平路河两岸。见图 2。

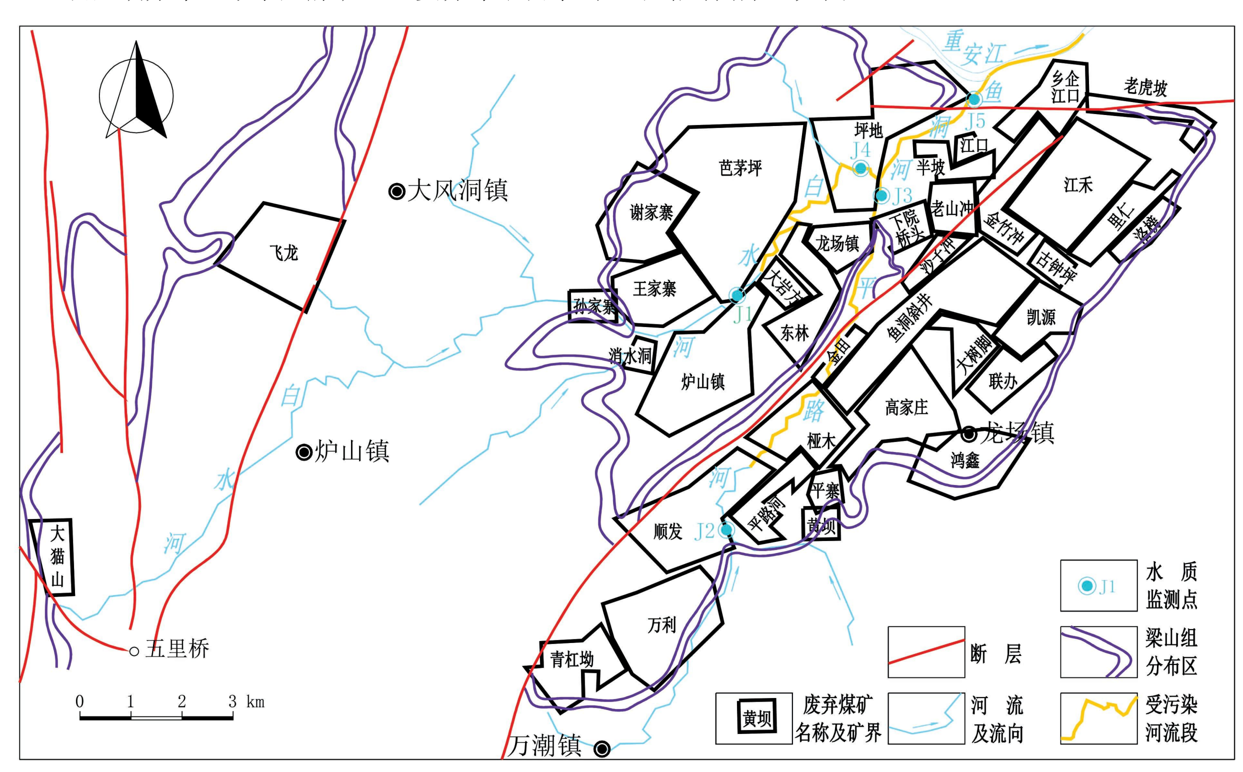



图 2 鱼洞河流域煤矿分布图

Fig.2 Coal mine distribution map of Yudong River basin

### 2.2 煤矿开采对水环境的影响模式

该区域煤矿基本采用房柱式开采。沿河流两侧分布的煤矿，多沿煤层底板掘通排水巷道，使采空区废水自流入附近河流。

煤矿开采前，上部栖霞、茅口灰岩中的地下水沿梁山组上部暗河系统的出口排入附近河流。煤矿开采并被关闭后，有的煤矿采空规模小，采空区积满水后沿井口流出，进入附近溪沟或河流而引起污染；有的煤矿采空规模大，采空区上部形成导水裂隙带[29]，局部导通了上部暗河系统，使上部栖霞、茅口灰岩中的地下水进入采空区后再沿煤矿排水巷道流入河流，从而造成河流污染。甚至有的煤矿因排水巷道进入煤系地层下伏的上泥盆统尧梭组（$D_3y$）中，还引起了串层污染。见图 3。

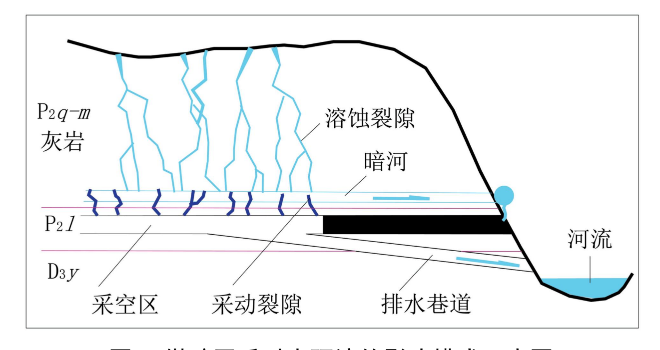



图 3 煤矿开采对水环境的影响模式示意图

Fig.3 Model of coal mining impact on water environment

## 3 鱼洞河流域煤矿废水治理方法

鱼洞河流域的污水治理工作已开展多年，有采用直接封堵井口的所谓“源头式”治理方法的，也有采用修建污水处理厂进行末端治理的。实践证明，采用末端式治理的项目因其运行成本居高不下而成为当地政府的“包袱”，而盲目的源头式治理也难以奏效，例如井口封堵位置的选择错误将导致串层污染、治理效果不佳，采空区情况不明的情况下采用保守而无针对性的治理方案还会造成大量的工程量浪费。

要有效治理废弃煤矿污水外排的“顽疾”，应根据问题导向、遵循“问题－成因－方法”的治理思路，必须要在摸清其开采的背景条件即找到“病根”的前提下，“对症下药”，才能谈得上真正的源头式治理，才会收到治理效果、达到治理目的。而鱼洞河流域的煤矿开采历史悠久，多以小型煤矿房柱式开采为主，煤矿的管理不规范且已被关闭多年，井下巷道及采空区的位置、范围等相关资料缺乏。为此，应先确定适宜的能够找到“病根”的勘查工作方法即“诊治方法”，才谈得上找到适宜的治理方法。

### 3.1 煤矿废水成因

废弃煤矿酸性废水的形成，是因为地下水携带煤系地层内的硫化物等从采空区流到地表后，在空气、水和细菌的共同作用下，其中的金属硫化物逐步被氧化，产生了大量的氢离子（$H^+$），形成硫酸、金属硫酸盐，并溶出矿石中的多种金属离子，因而形成含有铁、锰、铜、锌、铅、镉等的酸性废水。以硫铁矿为例，酸性废水产生的具体过程如下：

（1）硫铁矿在水和氧气参与下，转化为亚铁离子（$Fe^{2+}$）、硫酸根（$SO_4^{2-}$）和氢离子（$H^+$），即硫铁矿氧化产酸过程：

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+$$

（2）亚铁离子（$Fe^{2+}$）进一步氧化为三价铁离子（$Fe^{3+}$），并水解形成 $Fe(OH)_3$，同时，也进一步降低了废水的 pH 值：

$$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O \qquad Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$$

（3）三价铁离子（$Fe^{3+}$）作为催化剂，直接与硫铁矿（$FeS_2$）接触氧化产生亚铁离子（$Fe^{2+}$）、硫酸根（$SO_4^{2-}$）和氢离子（$H^+$）：

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+$$

由上可见，煤矿废水的形成因素包括硫化物、氧化作用、地下水及通道。真正的源头式治理方法，不仅要针对煤矿废水形成的地理位置方面的源头，更要针对煤矿废水形成因素方面的源头。

### 3.2 勘查工作方法

针对该区域的废弃煤矿分布情况，首次提出了“望、闻、问、切、追”的“中医式”勘查工作方法，以寻找地下水补给煤矿采空区的通道为主，具体为：

“望”：收集区域水文地质、工程地质、煤矿井口分布等相关资料，配合地面踏勘，初步了解煤矿分布区地表水与地下水的联系，对废弃煤矿污水的补给源、径流方向、排泄通道以及该片区的水文地质条件形成宏观印象；

“闻”：收集各监测点的水质化验分析等资料，配合地面观察发现的地表水污染变化情况，初步分析各废弃煤矿的废水与地表水的联系；

“问”：走访周边群众、原矿井工人和管理人员等，基本了解各废弃煤矿不同的井下开采情况；

“切”：在上述工作基础上，配合勘查单位开展有针对性的物探、钻探、化探工作，验证初步分析的结论，进一步分析各废弃煤矿分布区地下水与地表水的联系。

“追”：在应急救援队伍配合工作、保证安全的前提下，打开煤矿废弃巷道作为硐探手段，追索出水点、封堵后可能存在的漏水点，初步判定煤矿废水通道。

通过上述勘查工作，基本上确定了鱼洞河流域各废弃煤矿废水与地表水联系的不同特点。但因煤矿的关闭时间较长且井下资料缺乏、区域的水文地质条件复杂，只通过地表勘查手段彻底查明各煤矿的采空区、上部岩溶管道的具体分布位置以及导水裂隙带导通岩溶管道的位置是不现实的，还需要在治理工作中逐步发现问题并解决问题。

### 3.3 治理方法

由前述可知，煤矿废水的形成因素包括硫化物、氧化作用、地下水及通道，而要消除煤系地层内的硫化物是不现实的，故源头式的治理方法只能针对氧化作用、地下水及通道且必须要确定关键封堵位置。结合前述煤矿开采对水环境的影响模式，首次总结提出了“追、堵、截、围”的治理方法，具体为：

“追”：既是一种勘查手段，也是治理方法的一部分，用于确定可以实施封堵的关键位置；

“堵”：结合前述工作，确定最佳封堵段，由内至外进行封堵，把煤矿废水封闭在采空区内，同时避免地下水串层，以阻断地下水及通道、减轻氧化作用；内设水管，施工期间用做水质监测或减压[30]；

“截”：设置地表截排水沟，对地表煤矸石分布区进行治理，拦截地表补给源，减少煤矿采空区的地表径流补给量；

“围”：通过上述综合治理手段，逐步缩小煤矿废水分布范围，后期配合挡水墙、帷幕注浆等手段，进一步减轻氧化作用，并使地下水位抬升、使上部灰岩地下水逐渐回到原有通道，将煤矿废水围在采空区深部。

该方法的基本原理是改变地表水进入采空区后直接外流的路径，一是通过关键段的巷道封堵并配合必要的挡水墙、帷幕注浆等工程，隔绝废弃煤矿采空区的氧气，使氧化环境变成还原环境；二是通过抬升地

下水位，使顶板灰岩含水层地下水的径流逐步恢复到原有状态，使煤矿废水变成深部滞留水、使后续补给水从高位流出，从而使煤矿废水不外排或外排的时间缩短、水量减小、水质改善。

因该方法针对煤矿废水的成因，且属于源头式治理方法，故将上述方法定名为煤矿废水“成因－源头式生态关水污水治理法”。

### 3.4 治理步骤

由于各煤矿的开拓开采方式不尽相同，对地表的影响也不相同，且煤矿的关闭时间较长且井下资料缺乏，无法单纯采用地表手段彻底查明各煤矿的采空区、上部岩溶管道的具体分布位置以及导水裂隙带导通岩溶管道的位置，故需要在治理工作中针对不同的煤矿开拓、开采方式进行分类，通过动态施工的方式逐步发现问题并分部解决问题。

为使治理工程量更有针对性且节省工程量，应首先查明煤矿的开拓开采方式，按采空区与排水巷道的关系，可将煤矿分类为下山开采煤矿（采空区大部分低于排水巷道）、上山开采煤矿（采空区大部分高于排水巷道），“因矿施策”、分类治理；在施工“追、堵、截”部分的工程并待雨季检验治理效果后，再根据漏点及治理效果确定是否实施“围”的工程及其实施的具体位置、范围。

## 4 治理方法应用

鱼洞河流域的煤矿采空区分布位置、开拓开采的方式各有差异，相应的治理方法也不尽相同。

对井田范围位于地势较高处、排水巷道位置较高、主要采用下山开采的煤矿，或采空区面积相对较小、未与其它煤矿采空区连通、导水裂隙带导通上部灰岩中地下水通道可能性小的煤矿，单纯采用封堵关键段的方式即可使主要的采空区积水滞留在排水巷道标高下方、形成深部滞留水储存空间，基本可达到防止煤矿废水外排的治理效果。见图 4。

对排水巷道位置较低、主要采用上山开采的煤矿，或采空区面积较大、与其它煤矿采空区或浅部小窑巷道连通、导水裂隙带导通上部灰岩中地下水通道可能性大的煤矿，有的矿井地下水位升高后仍无外泄通道，单纯封堵关键段即可达到治理效果；而有外泄通道的矿井，除封堵外，还需根据实际情况采取帷幕灌浆、设置浅部挡水墙等治理手段，形成可供采空区废水滞留的空间，使外排的废水及污染物减量。见图 5。

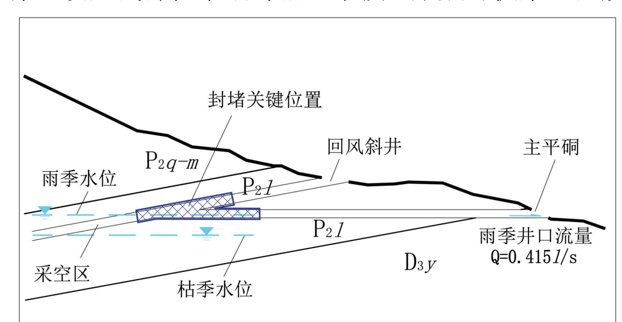



图 4 下山煤矿治理方式剖面示意图（以黄坝煤矿为例）
Fig.4 Section sketch of downward coal mine governance

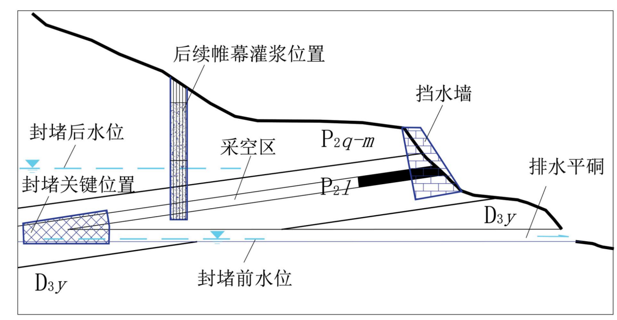



图 5 上山煤矿治理方式剖面示意图（以江禾煤矿为例）
Fig.5 Section sketch of upward coal mine governance

### 4.1 下山开采煤矿

包括黄坝、平路河、顺发、坪地、大猫山等煤矿及孙家寨片区，位置见图 2，基本情况见表 1。

表 1 下山开采煤矿基本情况简表
Table 1 Summary of basic conditions of downward coal mining

| 煤矿名称 | 开拓、开采方式 | 采空区情况 | 污水外排情况 |
|---|---|---|---|
| 黄坝 | 井口位置高，平硐+斜井开拓，见煤后向下山、走向方向开采 | 采空区规模小、相对独立；地表见 16 处老洞口、多处矸石堆积体 | 雨季采空区集满水后自平硐口溢流，流量 0.4$l$/s，枯季断流；其余老硐口无水 |
| 平路河 | 井口位置高，平硐+斜井开拓，见煤后向下山、走向方向开采 | 采空区规模中等、相对独立；地表见 20 余处老硐口 | 采空区积水自平硐口溢流，流量 6.6～30.9 $l$/s；其余老硐口无水 |
| 顺发 | 井口位置高，平硐+斜井开拓，见煤后向下山、走向方向开采 | 采空区规模较大、独立；地表见 20 处老硐口 | 采空区积水自 7#老平硐口溢流，流量 10～50 $l$/s；其余老硐口无水 |
| 大猫山 | 井口位置高，斜井开拓，见煤后向下山、走向方向开采 | 采空区规模较大、独立；地表见塌陷坑、矸石堆积体 | 采空区积水通过上部岩溶管道外排，泉 S41 处流量 40～111 $l$/s |
| 孙家寨片区 | 巷采为主，十多个老窑硐口分散开采 | 采空区规模小、分散、独立，地表多矸石堆积体 | 采空区积水自 6 个老硐口常年外排，总流量约 5.2～10.2 $l$/s；其余硐口雨季出水或无水 |

治理情况见表 2。

表 2　下山开采煤矿治理方式及效果

Table 2 Governance way and effect of downward coal mining

| 煤矿名称 | 已实施的治理工程 | 治理时间 | 治理效果 |
|---|---|---|---|
| 黄坝 | 封堵井筒关键段，地表设置截水沟、挡墙治理矸石堆 | 2021 年 7 月封堵井口完成 | 经历雨季，未见水流出 |
| 平路河 | 封堵井筒关键段 | 2021 年 9 月封堵井口完成 | 经历雨季，未见水流出；附近污水处理厂拆除 |
| 顺发 | 封堵井筒关键段 | 2021 年 11 月封堵井口完成 | 经历雨季，未见水流出 |
| 大猫山 | 封堵井筒关键段，地表设置截水沟、挡墙治理矸石堆，填埋塌陷坑 | 2021 年 11 月封堵井口完成 | 经历雨季，泉 S41 有水流出，但丰水期流量由 111 *l*/s 减小至 10 *l*/s；附近污水处理厂转做其它用途 |
| 孙家寨片区 | 封堵井筒关键段，地表设置截水沟、挡墙，治理矸石堆 | 2022 年 10 月施工完成 | 未见水流出，待雨季检验 |

### 4.2 上山开采煤矿

包括江禾、里仁、鱼洞斜井、半坡等煤矿，位置见图 2，基本情况见表 3。

表 3　上山开采煤矿基本情况简表

Table 3 Summary of basic conditions of upward coal mining

| 煤矿名称 | 开拓、开采方式 | 采空区情况 | 污水外排情况 |
|---|---|---|---|
| 江禾 | 平硐+斜井开拓，见煤后向各向开采，2#平硐标高低于大部分采空区 | 采空区规模较大、与相邻煤矿采空区连通；地表见 14 处老硐口及多处矸石堆 | 雨季采空区集满水后自井口溢流，1#井流量 43.6 *l*/s，2#井流量 23.0 *l*/s；其余老硐口无水 |
| 里仁 | 平硐+暗斜井开拓，见煤后向各向开采，主平硐标高低于大部分采空区 | 采空区规模中等、与相邻的江禾煤矿采空区连通；主平硐标高低、其余 7 处井口标高较高 | 采空区积水自主平硐口溢流，流量 23.5 *l*/s；其余井口无水 |
| 鱼洞斜井 | 斜井开拓，见煤后主要向下山、走向方向开采，但排水平硐位置低于采空区 | 采空区规模大、与周围采空区有联通可能；地表见 20 余处老硐口 | 采空区积水自排水平硐口溢流，流量 81.6～121.1 *l*/s；其余老硐口无水 |
| 坪地 | 井口位置低，平硐+斜井开拓，见煤后向上山、走向方向开采 | 采空区规模较大、独立；地表见 5 处老硐口 | 采空区积水自平硐口溢流，副平硐流量 1.8～5.0 *l*/s，主平硐流量 4.4～10.0 *l*/s；其余老硐口无水 |
| 半坡 | 沿煤层平硐开拓，向上山、走向方向开采，井口位置最低 | 采空区规模大、与周围采空区有联通可能；地表见 10 余处老硐口 | 采空区积水自 10 处老硐口溢流，总流量 25.7～77.0 *l*/s |

治理情况见表 4。

表 4　上山开采煤矿治理方式及效果

Table 4 Governance way and effect of upward coal mining

| 煤矿名称 | 已实施的治理工程 | 治理时间 | 治理效果 |
|---|---|---|---|
| 江禾 | 封堵井筒关键段，地表设置截水沟、挡墙治理矸石堆 | 2021 年 10 月封堵井口完成 | 经历雨季，见水沿其它老硐口流出。后沿煤层露头线施工挡水墙、堵塞老硐口；帷幕灌浆待施工 |
| 里仁 | 封堵井筒关键段 | 2021 年 10 月封堵井口完成 | 经历雨季，未见水流出 |
| 鱼洞斜井 | 封堵井筒关键段 | 2021 年 12 月封堵井口完成 | 经历雨季，见水沿煤层露头线或泉点流出，待下一步帷幕灌浆处理；附近污水处理厂停用 |
| 坪地 | 封堵主、副平硐关键段 | 2021 年 12 月封堵井口完成 | 经历雨季，未见水流出 |
| 半坡 | 封堵井筒关键段 | 正在施工，未完成 | 正在施工，未完成 |

## 5 治理效果

前述十处矿井，有六处治理效果良好，有一处基本取得效果，有三处尚未治理完成。

为说明治理效果，对设置于地表的五处地表水水质监测点（J1 位于芭茅坪煤矿上游，可说明大猫山煤矿及孙家寨片区的治理效果；J2 位于平路河村桥、J3 位于平路河进鱼洞河前 50m，可说明顺发、黄坝、平路河煤矿的治理效果；J4 位于白水河进鱼洞河前 50m，可说明大猫山、坪地煤矿及孙家寨片区的治理效果；J5 位于鱼洞河进重安江前，可说明全域煤矿的治理效果。监测点位置见图 2）的水质监测数据进行了汇总统计，治理前、后各地表水监测点的 pH 值变化见图 6，各监测点的 Fe、Mn 含量变化见图 7～图 11。

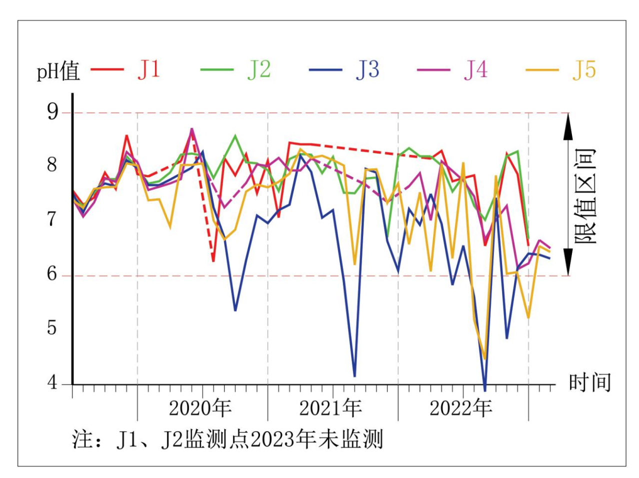



图 6 各监测点 pH 值曲线

Fig.6 PH curve of each monitoring point

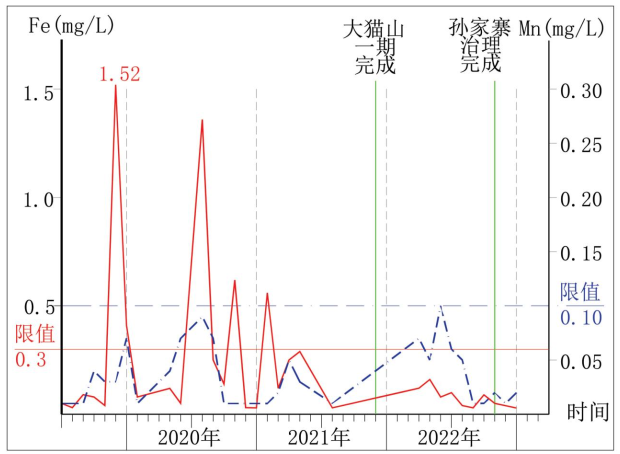



图 7 J1 监测点 Fe、Mn 浓度值曲线

Fig.7 J1 Monitoring point Fe、Mn concentration curve

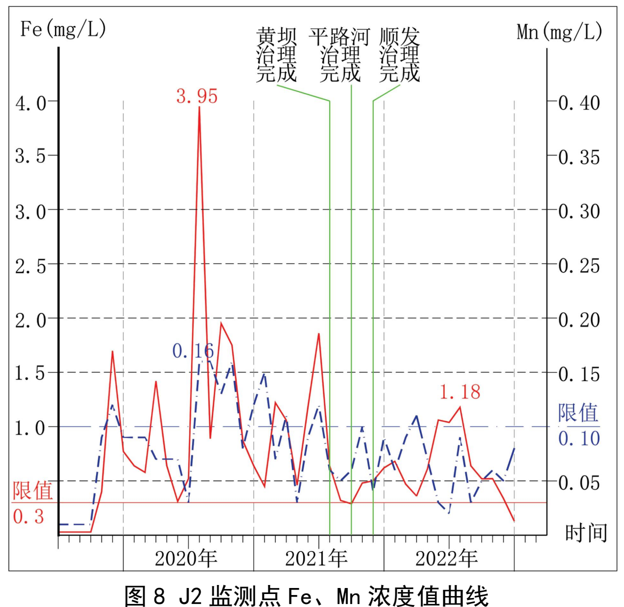



图 8 J2 监测点 Fe、Mn 浓度值曲线

Fig.8 J2 Monitoring point Fe、Mn concentration curve

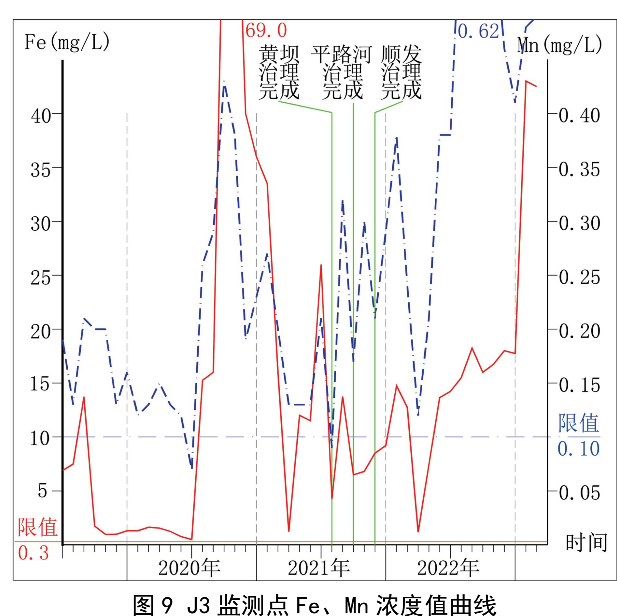



图 9 J3 监测点 Fe、Mn 浓度值曲线

Fig.9 J3 Monitoring point Fe、Mn concentration curve

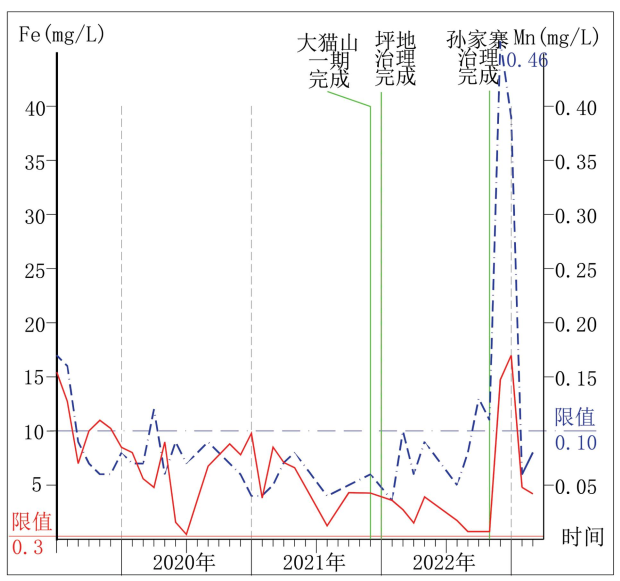



图 10 J4 监测点 Fe、Mn 浓度值曲线

Fig.10 J4 Monitoring point Fe、Mn concentration curve

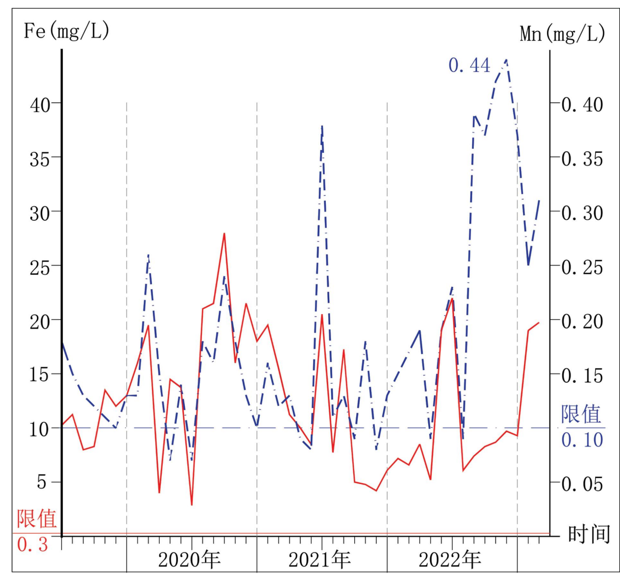



图 11 J5 监测点 Fe、Mn 浓度值曲线

Fig.11 J5 Monitoring point Fe、Mn concentration curve

由图 6 可见，治理前，除 J3 监测点雨季时因受鱼洞泉的污水排放量增加而 pH 超标外，其余监测点 pH 值均不超标；治理后，J3、J5 监测点 pH 值均有超标现象，无法说明治理效果。

由图 7 可见，治理前，J1 监测点的 Fe 有超标现象（最多 1.52mg/L，超标 4.1 倍），Mn 不超标；大猫山煤矿、孙家寨片区治理后，Fe、Mn 均不再超标，Fe 浓度呈明显下降趋势。治理效果较明显。

由图 8 可见，治理前，J2 监测点的 Fe 基本均超标（最多 3.95mg/L，超标 12.2 倍），Mn 有超标现象（最多 0.16mg/L，超标 0.6 倍）；黄坝、平路河、顺发煤矿治理后，Fe、Mn 仍有超标但峰值明显下降（Fe 最多 1.18mg/L，超标 2.9 倍；Mn 最多 0.11mg/L，超标 0.1 倍），Fe、Mn 浓度呈明显下降趋势。治理效果较明显。

由图 9 可见，治理前，J3 监测点的 Fe、Mn 基本均超标（Fe 最多 69mg/L，超标 229 倍；Mn 最多 0.43mg/L，超标 3.3 倍）；黄坝、平路河、顺发煤矿治理后，Fe、Mn 仍有超标（Fe 最多 43mg/L，超标 142 倍；Mn 最多 0.62mg/L，超标 5.2 倍）。因 J2、J3 之间有鱼洞泉及其它煤矿的废水汇入，治理效果显现不明显。

由图 10 可见，治理前，J4 监测点的 Fe 基本均超标（最多 15mg/L，超标 49 倍），Mn 偶有超标（最多 0.17mg/L，超标 0.7 倍）；坪地、大猫山煤矿、孙家寨片区治理后，Fe、Mn 基本均超标（Fe 最多 16mg/L，超标 52 倍；Mn 最多 0.46mg/L，超标 3.6 倍）。因 J1、J4 之间有其它煤矿的废水汇入（特别是 2022 年 11、12 月出现极大异常，估计因孙家寨片区治理后煤矿废水从芭茅坪煤矿井口流出），治理效果显现不明显。

由图 11 可见，治理前，J5 监测点的 Fe、Mn 基本均超标（Fe 最多 28mg/L，超标 92 倍；Mn 最多 0.38mg/L，超标 2.8 倍）；治理后，Fe、Mn 仍超标（Fe 最多 22mg/L，超标 72 倍；Mn 最多 0.44mg/L，超标 3.4 倍）。该监测点为鱼洞河流域的最终监测点，有鱼洞泉及其它未治理煤矿的废水汇入，治理效果显现不明显。

## 6 结语

（1）“成因－源头式生态关水污水治理法”针对煤矿废水的成因，基本原理是改变地表水进入采空区后直接外流的路径，通过关键段的巷道封堵并配合必要的挡水墙、帷幕灌浆等手段，隔绝废弃煤矿采空区的氧气，同时抬升地下水位，使顶板灰岩含水层地下水的径流逐步恢复到原有状态、使煤矿废水变成深部滞留水、使后续补给水从高位流出，从而使煤矿废水不外排或外排的水量减小、水质改善。多处治理点经雨季检验证明治理效果显著，且因分部实施治理工程，使治理费用大大降低。可为类似地区的废弃煤矿污水治理提供借鉴。

（2）鉴于无法仅通过地表勘查手段彻底查明各煤矿的采空区、上部岩溶管道的具体分布位置以及导水裂隙带导通岩溶管道的位置，故需要在治理工作中针对不同的煤矿开采方式，分类、分部实施治理工程，可使治理工作更有针对性且节省工程量。

（3）排水巷道高于采空区的矿井，封堵关键段后治理效果良好。而采空区面积大、排水巷道低于采空区的矿井，封堵关键段导致采空区水位上升后，采空区积水会寻找新的排水通道，治理难度较大，在治理工程手段及实施位置的选择方面，尚值得进一步研究。

## 参考文献


[1] 武强，董东林，傅耀军，等. 煤矿开采诱发的水环境问题研究[J]. 中国矿业大学学报，2002，31(01)：19-22.
[2] TANG Changyuan，WU Pan，TAO Xiuzhen，etc.. The basin acidification affected by AMD：A case study in Xingren county，Guizhou，China[J]. CARSOLOGICA SINICA，2009，28(02)：135-143.
[3] 李怀展，查剑锋，元亚菲. 关闭煤矿诱发灾害的研究现状及展望[J]. 煤矿安全，2015，46(05)：201-204.
[4] 郑雅杰，彭映林，李长虹. 二段中和法处理酸性矿山废水[J]. 中南大学学报（自然科学版），2011，42(05)：1215-1219.
[5] 杨晓松，邵立南，刘峰彪，等. 高浓度泥浆法处理矿山酸性废水机理[J]. 中国有色金属学报，2012，22(04)：1177-1183.
[6] 石太宏，杨娣，冯玉香，等. SAPS 处理酸性矿山废水的模拟应用研究[J]. 环境工程学报，2015，9(05)：2277-2283.
[7] 林海，李真，贺银海，等. 硫酸盐还原菌治理酸性矿山废水研究进展[J]. 环境保护科学，2019，45(05)：25-31.
[8] 王颖南，邓奇根，王浩，等. 硫酸盐还原菌胞外聚合物处理酸性矿山废水的研究进展[J]. 水处理技术，2020，46(12)：7-11.
[9] 王秀田. 煤矿井下废水的污染分析及治理措施研究[J]. 山西化工，2021，42(01)：231-233.
[10] 周立祥. 生物矿化：构建酸性矿山废水新型被动处理系统的新方法[J]. 化学学报，2017，75(06)：552-559.
[11] 郭超，刘怀英，马兆瑞，等. 煤矿废水处理工艺及应用分析[J]. 煤炭工程，2015，47(05)：79-82.
[12] 赵计伟，张庆海，王宁涛，等. 酸性矿山废水处理技术研究进展与展望[J]. 矿产勘查，2021，12(04)：1049-1055.
[13] 高建国，王大州. 贵州煤矿区矿井水水质特点及处理工艺探讨[J]. 中国煤炭地质，2014，26(05)：49-52+67.
[14] 莫樊，郁钟铭，吴桂义，等. 煤矿矿井水资源化及综合利用[J]. 煤炭工程，2009，41(06)：103-105.
[15] 张瑞雪，吴攀，杨艳，等. 贵州煤矿酸性废水“被动处理”技术的新方法探讨[J]. 地球与环境，2010，38(02)：250-254.
[16] 康娓，胡文，陈守应.煤矿酸性废水处理技术的应用研究[J]. 环境工程，2012，30(04)：46-47+69.
[17] 谢代兴，孟小军，唐建生，等. 煤矿废水对岩溶区水源及土壤污染、危害与评价[J]. 中国农学通报，2013，29(32)：296-302.
[18] 刘 海，张加广，林义芳. 龙里县废弃煤矿井废水污染治理研究[J]. 广州化工，2017，45(09)：162-164+172.

[19] 胡长春，宋威，雷宇. 利用人工水坝治理受煤矿废水污染河流[J]. 环保科技，2021，27(04)：44-46+58.
[20] 梁浩乾，冯启言，周来，等. 鱼洞河流域废弃煤矿矿井水对水环境的影响[J]. 水土保持研究，2019，26(06)：382-388.
[21] 段江飞，赵建鹏，任虎俊，等. 贵州凯里市鱼洞河流域水质污染因子及其变化分析[J]. 中国煤炭地质，2018，30(06)：96-100+118.
[22] 于春勇，任虎俊. 贵州省鱼洞河流域桃子冲岩溶泉污染现状及机理[J]. 中国煤炭地质，2021，33(11)：51-55+72.
[23] 罗康生，代胜，李仁启，等. 贵州鱼洞河流域矿区水文地球化学探究[J]. 冶金管理，2022，35(11)：65-67.
[24] 许 帅，李梦霞，李冲，等. 基于 GIS 分析鱼洞河流域岩溶水水化学特征[J]. 地下水，2022，44(03)：22-25+50.
[25] 张钟远，陆治斌，徐世光，等. 凯里市鱼洞河矿区矿井水水化学特征及污染地下水途径[J]. 地质灾害与环境保护，2022，32(02)：86-92.
[26] 李曦滨. 煤矿酸性废水污染综合治理技术与展望[J]. 中国煤炭地质，2018，30(07)：48-53+93.
[27] 李曦滨. 综合勘查技术方法在喀斯特地区煤矿酸性矿井水污染勘查的应用[J]. 中国煤炭地质，2021，33(12)：76-82.
[28] 李文波. 凯里市鱼洞河流域煤矿酸性废水及煤矸石治理方案研究[J]. 黑龙江水利科技，2019，47(09)：54-56.
[29] 王彤标. 贵州山区煤矿开采对地表影响范围探究[J]. 煤炭工程，2018，50(08)：141-144.
[30] 王彤标，田要广，靳雪姣，等. 一种废弃煤矿井口的封堵方法：中国，ZL202010836753.1[P]. 2022-03-01.

**第一作者简介：**王彤标（1967－），男，河北昌黎人，研究员，长期从事岩土工程勘察、地质灾害危险性评估与治理、煤矿防治水等工作。
通信地址：贵州省贵阳市花溪区大职路贵州省煤矿设计研究院内（550025）
电话：13885131031　　E－mail：wangtongbiao@163.com

**通讯作者简介：**田要广（1984－），男，河北邯郸人，高级工程师，从事岩土工程设计、地质灾害治理、煤矿防治水等工作。
通信地址：贵州省贵阳市花溪区大职路贵州省煤矿设计研究院内（550025）
电话：18892372658　　E－mail：460276392@qq.com

**基金项目：**贵州省煤矿安全高效开采技术支撑与服务人才基地基金资助（GKY-RD2022.KJ-012）
黔科合支撑[2023]一般143　基于综合探查技术的鱼洞河废弃煤矿酸性水生成控制及综合治理技术研究